

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



انجمن بتن ایران



انجمن مهندسی روسازی ایران

کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک شبکه سنسورهای بی‌سیم*

مقاله پژوهشی

سیدحسین فضائلی حسینی‌نژاد(۱)   عباس کرم الدین(۲)

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79624.1195

چکیده *کنترل سازه‌ها به منظور جلوگیری از آسیب جدی به سازه‌ها، به یک موضوع برجسته در مهندسی زلزله تبدیل شده است. در سیستم‌های سنتی کنترل سازه از سیم برای ارتباط بین سنسورها، محرک‌ها، کنترل‌کننده‌ها و یکپارچه‌سازی کل سیستم به عنوان یک شبکه واحد استفاده می‌شد. بهره‌جویی از سنسورهای بی‌سیم به منظور اندازه‌گیری، ارتباط و کنترل در سازه‌ها با پیشرفت تکنولوژی افزایش یافته است. از مزایای دیگر این سیستم، سهولت در پیاده‌سازی و کاهش هزینه‌های نصب می‌باشد. در این مقاله سازه سه طبقه غیرخطی محک (Benchmark) به همراه میراگر مغناطیسی (MR) که به شبکه سنسورهای بی‌سیم مجهز شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. سازه تحت تحریک زلزله در محیط شبیه ساز متلب ۲۰۱۸، با یک شبکه حسگر بی‌سیم شبیه‌سازی شده توسط TOSSIM ترکیب می‌شود. برای شبیه‌سازی واقعی شبکه از نویز و سیگنال‌های بی‌سیم جمع آوری شده از یک سازه واقعی استفاده شده است. در این شبکه از یک پروتکل دسترسی چندگانه تقسیم زمان TDMA استفاده شده است. این پروتکل به هر سنسور زمان خاصی برای ارسال اطلاعات اختصاص می‌دهد. برای کنترل پاسخ‌های سازه محک از یک کنترل‌کننده فازی-ژنتیک استفاده شده است. سپس سازه مجهز به سنسورهای بی‌سیم و باسیم، تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بررسی معیارهای ارزیابی و نمودارهای تاریخچه زمانی نشان از عملکرد مناسب سیستم بی‌سیم در کاهش پاسخ‌های سازه دارد. در عین حال سیستم بی‌سیم، باعث افزایش اندک میزان میانگین جابه‌جایی و شتاب طبقات نسبت به حالت باسیم شده است.*

واژه‌های کلیدی سازه محک، سنسورهای بی‌سیم، سازه غیرخطی، میراگر مغناطیسی، کنترل نیمه فعال.

Semi-active control of three-story benchmark structure using a wireless sensor network

Hossein Fazaeli   Abbas Karamodin

Abstract *Control of structures in order to prevent serious damage to structures has become a prominent issue in earthquake engineering. In traditional structural control systems, wires were used to communicate between sensors, actuators, controllers and integrate the entire system as a single network. Using of wireless sensors for measurement, communication and control in structures has increased with the advancement of technology. The use of this technology has attracted the attention of engineers due to the reduction of installation costs and flexible system. In this article, the benchmark nonlinear three-story structure with magnetorheological damper (MR) equipped by wireless sensor network is investigated. The seismically excited building is combined with a wireless sensor network simulated by TOSSIM in the MATLAB 2018 simulator environment. For real network simulation, noise and wireless signals collected from a real structure have been used. In this network, a time division multiple access protocol (TDMA) is used. This protocol assigns a specific time to each sensor to send information. The benchmark structure is trained by a fuzzy-genetic controller. Then, the structure equipped with wire and wireless sensors was evaluated under the various earthquakes. Examining the evaluation criteria and time history charts shows the proper performance of the wireless system in reducing structural responses. At the same time, the wireless system has caused a slight increase in the average displacement and acceleration of floors compared to the wired mode.*

Keywords Benchmark structure, Wireless sensor, nonlinear building, magnetorheological damper, Semi active control.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۷ می‌باشد

(۱) دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

(۲)نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

Email: a-karam@um.ac.ir

مقدمه

سیستم‌های سنتی کنترل سازه فعال، نیمه فعال و ترکیبی اغلب از کابل‌ها برای ارتباط بین سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها استفاده می‌کنند. در چنین سیستم‌هایی، نصب سنسورهای سیمی معمولا بسیار وقت‌گیر و گران است. علاوه بر این، استقرار چنین کابل‌کشی گسترده در سازه‌های عمرانی در مقیاس بزرگ کاری دشوار است [1-3]. به منظور کاهش هزینه‌های مالی و زمانی سیستم‌های مبتنی بر سیم، فناوری‌های جدید ارتباطات بی‌سیم در سازه‌ها در تحقیقات دانشگاهی و صنعتی برای سنجش و نظارت بی‌سیم استفاده شده است. در سال‌های اخیر، علم کنترل سازه بی‌سیم به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های کنترل همراه با سیم معرفی شده است. کاهش زمان نصب، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری همراه با مصرف انرژی کم، کنترل بی‌سیم را در مقایسه با سیستم کنترل کلاسیک بسیار جذاب می‌کند. تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری بر روی سازه‌های مجهز به این نوع سنسورها صورت گرفته است. Wang و همکاران یک سازه سه طبقه مجهز به میراگر MR با مقیاس ۰/۵ را مورد تحلیل عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. هر دو نتایج تجربی و عددی نشان از کارایی کنترل بی‌سیم غیرمتمرکز برای سیستم‌های کنترل سازه‌ای دارد [4]. Lynch و همکاران[5] با هدف کنترل سازه بی‌سیم به کمک تعداد زیادی از سنسور، یک سیستم بی‌سیم غیر متمرکز را مورد بررسی قرار دادند. آنها سه سیستم کنترل غیر متمرکز را مورد بررسی قرار دادند. سیستم کنترلی غیر متمرکز عملکرد بهتری نسبت به دو سیستم دیگر داشت. Sun و همکاران[6] یک سازه میراگر جرم فعال را به شبکه سنسورهای بی‌سیم مجهز کردند. آنها مدلی عددی را به عنوان سازه محک معرفی کرده تا محققان با کار برروی این سازه مرجع بتوانند الگوریتم‌های کنترلی و مسائل سنسورهای بی‌سیم را مورد تحقیق و بررسی قرار دهند. شبکه بی‌سیم مورد استفاده در این پژوهش، مدل محک Sun و همکاران می‌باشد.

وجود کابل در یک سیستم کنترل بی‌سیم تا حد ممکن به حداقل رسیده است. با این وجود چالش‌های ذاتی در ارتباط با سیستم بی‌سیم مانند تأخیر زمانی و از بین رفتن داده‌ها وجود دارد. یکی از راه‌های کاهش این اثرات استفاده از استراتژی‌های کنترل غیر متمرکز (Decentralized control) یا تقریبا غیر متمرکز (Partially decentralized control) در سیستم‌ها است. از طرف دیگر، الگوریتم‌های کنترل سازه‌ای که این اثرات را در نظر می‌گیرند، باید در سیستم پیاده‌سازی شوند. یک الگوریتم کنترل غیر متمرکز توسط Linderman بر روی یک سازه برشی مجهز به میراگر AMD یک طبقه در مقیاس کوچک اجرا شد. تأخیر ورودی با افزودن یک تأخیر زمان گسسته در فضای حالت لحاظ شد [7]. یک کنترل‌کننده غیر متمرکز H2/LQG با تأخیر زمانی بر روی مدل پل کابلی معیار توسط فلاح و تقی‌خانی، پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفت. تأخیر زمان انتقال بی‌سیم به عنوان یک مرحله تأخیر در اندازه‌گیری سیستم زمان گسسته مدل می‌شود. کنترل‌کننده غیر متمرکز با حل سه معادله غیرخطی همراه با روش مبتنی بر گرادیان محاسبه می‌شود. کنترل غیر متمرکز با تأخیر زمانی می‌تواند به طور مؤثری پاسخ لرزه‌ای پل کابل معیار را کاهش دهد [8]. محققان دانشگاه میشیگان یک شبکه حسگر بی‌سیم (WSN) را در یک سازه برشی شش طبقه با دستگاه‌های کنترل نیمه فعال مستقر کردند. در پژوهش آنها یک کنترل‌کننده LQR با استراتژی تقریبا غیر متمرکز ارائه شده است که از تخمین حالت اضافی (Redundant state estimation) به عنوان ابزاری برای به حداقل رساندن نیاز به برقراری ارتباط داده‌های بین سنسورها استفاده می‌کند. این روش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی از یک مدل ساختمان شش طبقه تحت تحریک زلزله صحت‌سنجی شد [9]. در پژوهش‌های پیشین، سیستم کنترل بی‌سیم بر روی سازه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از یک شبکه سنسورهای بی‌سیم بر روی یک سازه محک معتبر تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله استفاده از یک شبکه سنسور بی‌سیم و پیاده‌سازی آن روی سازه محک سه طبقه و همچنین طراحی یک کنترل‌کننده فازی – ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه نتایج آن با سنسورهای باسیم انجام شده است. همچنین برای جبران تأخیر زمانی، از یک کنترل فازی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

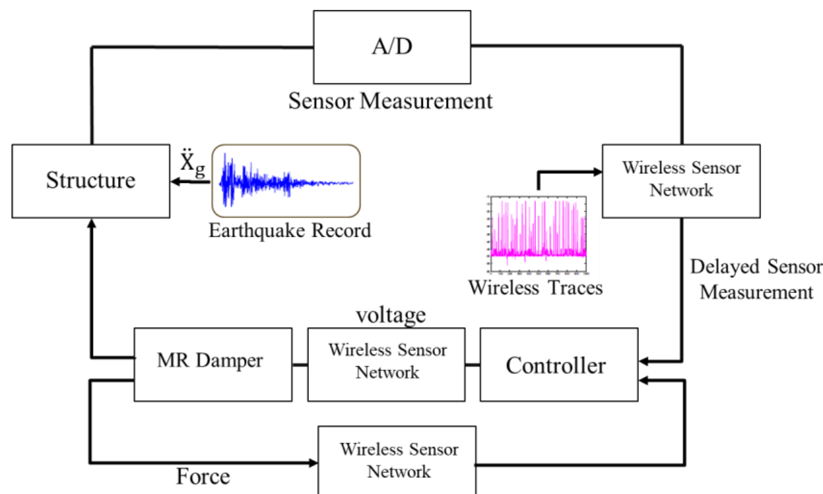
در شکل (۱) راهبرد کلی کنترل بی‌سیم به نمایش در آمده است. در این مدل پس از تحریک پایه، سنسورها اطلاعات اندازه‌گیری شده خود را توسط شبکه به کنترل‌کننده منتقل می‌کنند. اطلاعات یک گام قبل میراگر نیز توسط شبکه دیگری به کنترل‌کننده فرستاده می‌شود. کنترل‌کننده پس از تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر، اطلاعات را توسط شبکه دیگری به سنسورهای موجود در طبقات می‌فرستد. تمامی شبکه‌های بی‌سیم، اطلاعات را همراه با نویزهای جمع‌آوری شده به

سنسور مبدأ انتقال می‌دهند.

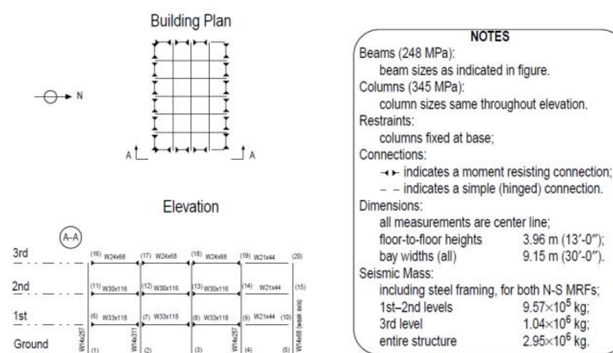
سازه محک

مدل مورد استفاده در این پژوهش یک سازه غیرخطی ۳ طبقه محک می‌باشد که در شکل (۲) به نمایش در آمده است. ابعاد پلان این سازه ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۸۷ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر و ارتفاع کلی ساختمان ۱۱/۹۶ متر می‌باشد. فاصله محور تا محور ستون‌ها ۹/۱۵ متر است. چهار دهانه در راستای شمال به جنوب و شش دهانه در راستای شرق به غرب وجود دارد. سیستم مقاوم جانبی سازه در دو جهت در قاب‌های پیرامونی از نوع خمشی و قاب‌های داخلی از نوع مفصلی می‌باشند [10].

با توجه به اینکه دو قاب پیرامونی در تحمل نیروهای زلزله نقش دارند، می‌توان با تقسیم نیروی زلزله به قسمت مساوی بین دو قاب، آن را به صورت یک قاب دوبعدی مدل‌سازی و مورد ارزیابی قرار داد. سازه دارای سه مود ارتعاشی با فرکانس‌های ۰/۹۹ ، ۳/۰۶ و ۵/۸۳ هرتز می‌باشد. مفصل‌های خمیری در دو انتهای عضو به صورت متمرکز مدل شده‌اند. در این سازه به دلیل محدودیت در ظرفیت میراگر MR، سه محرک در طبقه اول و دو محرک در طبقات دوم و سوم به کار گرفته شده است. در هر طبقه دو سنسور تعبیه شده که وظیفه اندازه‌گیری نیرو و شتاب طبقات را بر عهده دارند. سه کنترل‌کننده فازی در هر طبقه در نظر گرفته شده است که ورودی هر کنترل‌کننده نیروی گام قبل و نیروی تولید شده توسط کنترل‌کننده خطی در همان طبقه می‌باشد. قوانین کنترل‌کننده فازی برای سه طبقه یکسان است. سازه تحت تحریک ۴ شتاب‌نگاشت السنترو، هاچینوهه، نورثریج و کوبه قرار گرفته است.



شکل ۱ راهبرد کنترل بی‌سیم



شکل ۲ توصیف ساختمان ۳ طبقه محک برای ارزیابی در این مطالعه [10]

در کنترل نیمه فعال با اعمال کنترل‌های فعال و مقاوم به طور هم‌زمان بر روی سازه به طور کامل از مزایای هر دو روش استفاده می‌شود. برخی ویژگی‌های بارز از جمله کنترل خوب، هزینه پایین، مصرف انرژی ناچیز و کاربرد آسان، این سیستم را به سیستمی با کارایی بالا تبدیل کرده است. با این حال، در فرایند کنترل، دستگاه کنترل می‌تواند به طور لحظه‌ای پارامترهای خود را با استفاده از انرژی خارجی تنظیم کند. در سویی دیگر انرژی مکانیکی اضافی به سیستم وارد نمی‌شود. در نتیجه می‌تواند پایداری سیستم را تضمین کند. به طور کلی، کنترل نیمه فعال به عنوان نوعی سیستم غیر فعال با قابلیت کنترل در نظر گرفته می‌شود. با قطع منبع انرژی این سیستم می‌تواند بلافاصله به سیستم کنترل غیر فعال تبدیل شود تا نقش کنترل‌کننده را ایفا کند. کنترل نیمه فعال در اصل نوعی کنترل‌کننده پارامتر است که با تغییر سختی یا میرایی سازه، ارتعاش سازه را کاهش می‌دهد. بنابراین این فناوری کاربردهای گسترده‌ای در علوم مهندسی دارد.

میراگر MR از نوع میراگرهای با قابلیت کنترل سیال هستند. مایعات مگنتورئولوژیکال (MR) از مایعات چسبناک حاوی ذرات میکرونی شده از مواد مغناطیسی تشکیل شده است. هنگامی که مایع در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات، ساختارهایی ستونی ایجاد می‌کنند که برای شروع جریان نیاز به اعمال حداقل تنش برشی دارند. این اثر برگشت‌پذیر و بسیار سریع است به طوری که زمان واکنش آن در حد میلی ثانیه می‌باشد. برخی از مایعات در میدان الکتریکی رفتار یکسانی دارند. این مایعات، الکترورئولوژیکال (ER) نامیده می‌شوند. با این حال، عملکرد آنها با توجه به امکان شکست میدان الکتریکی محدود است و در حال حاضر نسبت به میراگرهای MR کاربرد کمتری دارد. از چالش‌های مرتبط با این میراگرها مدل‌سازی دقیق رفتار چرخه‌ای غیرخطی آنها است. یک مدل ساده مکانیکی براساس مدل بوک-ون در کنار یک میراگر ویسکوز برای مدل‌سازی دقیق رفتار برشی میراگر MR پیشنهاد شده است [11,12]. معادلات (۴-۱) معادلات حاکم بر مدل‌سازی این میراگر می‌باشند.

$$f = c_0\dot{x} + \alpha z \quad (۱)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A\dot{x} \quad (۲)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۳)$$

$$\alpha = c_{0a} + c_{0b} u \quad (۴)$$

در این روابط x جابه‌جایی نسبی دو سر میراگر و z متغیر تکاملی وابسته به تاریخچه پاسخ می‌باشد. با استفاده از پارامترهای β،α و γ می‌توان شیب رفتار خطی و همچنین انحنای ناحیه گذر از خطی به غیر خطی را تغییر داد. خروجی جریان مدار الکتریکی توسط رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۵)$$

ظرفیت میراگر انتخاب شده ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و مشخصات مکانیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

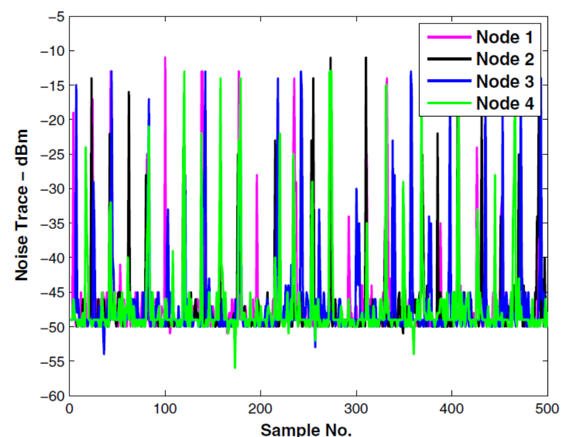
شبکه سنسورهای بی‌سیم

مدل‌سازی شبکه که شامل مسیرهای نویز/سیگنال، توپولوژی بی‌سیم و پروتکل‌های شبکه می‌باشد، توسط شبیه‌ساز TOSSIM پیاده‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی واقعی شبکه، نویزهای تجربی و شاخص قدرت مسیرهای سیگنال دریافت شده (Redundant state estimation) (RSSI) به عنوان ورودی TOSSIM استفاده شده است. این مقادیر به صورت فیزیکی توسط دستگاه‌های خاصی اندازه‌گیری و به عنوان ورودی شبیه‌ساز استفاده شده است. این شاخص معیاری برای کیفیت سیگنالی است که می‌تواند از مسیریاب دریافت کند. این مسیرها توسط دستگاه‌های Telosb که به رادیو TI CC2420 مجهز شده‌اند و طبق استاندارد IEEE 802.15.4 می‌باشند، در یک سازه پنج طبقه در دانشگاه واشنگتن مستقر شده‌اند.

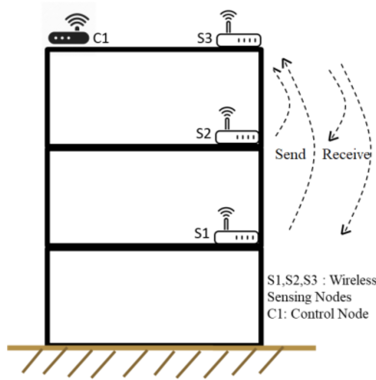
جدول ۱ مشخصات مکانیکی میراگر مغناطیسی MR

parameter	Value	parameter	Value	parameter	Value
α_a	1.0872e5 N/m	c_{0b}	44.0 $N\frac{s}{cmV}$	γ	$3\,cm^{-1}$
α_b	4.9616e5 $N/(cm\,V)$	A	1.2	β	$3\,cm^{-1}$
c_{0a}	4.4 $N\ s/cm$	n	1	η	$50\ n^{-1}$

CC2420 یک تراشه واقعی ۲/۴ گیگاهرتزی IEEE 802.15 است که برای اهداف با مصرف پایین و ولتاژ کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نویزهای اندازه‌گیری شده در شکل (۳) به نمایش در آمده است. در سازه محک سه طبقه، یک سنسور مبنا در بام، سه سنسور برای اندازه‌گیری شتاب طبقات و سه سنسور نیز برای اندازه‌گیری نیروی هر طبقه مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه استقرار و ارتباط این سنسورها با هم در شکل (۴) به نمایش در آمده است. این شبکه از پروتکل چندگانه تقسیم زمان TDMA بهره می‌برد که در آن زمان خاصی برای هر سنسور برای انتقال اطلاعات اختصاص می‌دهد. شبکه TDMA برای سیستم‌های کنترل، مطلوب است زیرا تأخیرهای تحت شبکه TDMA قطعی هستند. استاندارد شبکه مبتنی بر IEEE 802.15.4 معمولا زمان ۱۰ میلی ثانیه را برای هر شیار در نظر می‌گیرد. میزان تأخیر زمانی در کل سیستم ۳۰ میلی ثانیه می‌باشد.

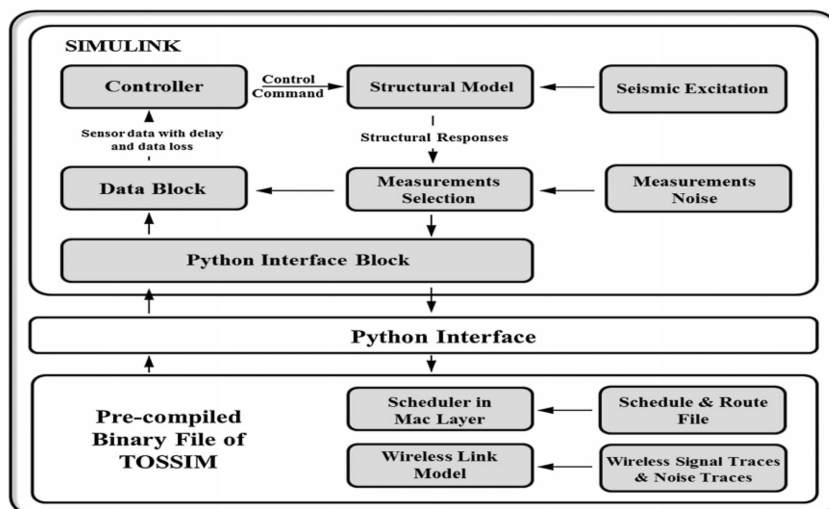


شکل ۳ نویزهای اندازه‌گیری شده سنسورها [6]



شکل ۴ نحوه ارتباط و قرارگیری سنسورها در سازه ۳ طبقه محک

ساختار مدل محک کنترل بی‌سیم در شکل (۵) بـه نمـایش در آمده است. مدل محک بی‌سیم در محیط متلب، شبیه‌سازی و اجرا می‌شود. انتقال داده‌ها از طریق شبکه بی‌سیم بـا اسـتفاده از یک بلوک واسطه تعبیه شده برای ارتباط با پایتون انجام می‌شود. سپس برنامه پایتون ارتباط با TOSSIM را برقرار می‌کند. پس از تعیین مسیرها و برنامه انتقال که توسط ماژول مدیر شبکه تعیین شده است، TOSSIM ارتباط بی‌سیم نقطه بـه نقطـه داده‌هـای سنسور را از سنسورها به ایستگاه مبنا شـبیه‌سـازی مـی‌کنـد و سپس تأخیر بسته را به بلوک رابط پایتون از طریق رابط پـایتون باز می‌گرداند. اطلاعات سنسور همراه با اطلاعات تأخیر ز مانی به «بلوک داده» فر ستاده می شود. سپس داده های تأخیریِ سنسورها، به سنسور مبنا یا کنترل‌کننده ارسال می شود. مـدت زمان تأخیر سنسورها در هر شبکه ۱۰ میلی ثانیه می‌باشد.



شکل ۵ ساختار مدل بی‌سیم [6]

کنترل‌کننده LQG و فازی-ژنتیک

در این پژوهش از کنترل‌کننده ترکیبی فضائلی و کرم الدین، که شامل یک کنترل‌کننده خطی LQG و یک کنترل‌کننده فازی بهینه شده می‌باشد، استفاده شده است [13]. هدف استفاده از کنترل‌کننده فازی، تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر MR و جبران خطای موجود بین نیروی کنترل‌کننده خطی و سازه غیرخطی و همچنین جبران تأخیر زمانی سیستم بی‌سیم می‌باشد. مطابق شکل (۶) در این سیستم پیشنهادی شتاب طبقات وارد کنترل‌کننده خطی LQG شده و سپس نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه به دست می‌آید. نیروی کنترل‌کننده خطی LQG و نیروی تولید شده توسط میراگر MR در گام قبل وارد کنترل‌کننده فازی تاکاگی سوگنو می‌شود. هر طبقه کنترل‌کننده فازی مربوط به خود را دارد ولی قوانین برای هر سه ساختار فازی یکسان است. پارامترهای خروجی مدل فازی توسط الگوریتم ژنتیک به گونه‌ای تعیین می‌شوند که تابع هدف مورد نظر کمینه شود. معیار بهینه‌سازی، کمینه کردن بیشینه نسبت تغییر مکان سازه کنترل شده به کنترل نشده است. پس از آموزش سیستم، کارایی کنترل‌کننده بی‌سیم در زلزله‌های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. پایگاه قوانین فازی در جدول (۲) به نمایش در آمده است.

خروجی کنترل‌کننده فازی تاکاگی سوگنو بر دو نوع عدد ثابت و خطی می‌باشد. در این پژوهش به دلیل دقت بالا و عملکرد بهتر کنترل‌کننده از نوع خطی آن استفاده شده است. در این حالت ولتاژ خروجی ترکیبی از ورودی‌ها با یک عدد ثابت خواهد بود.

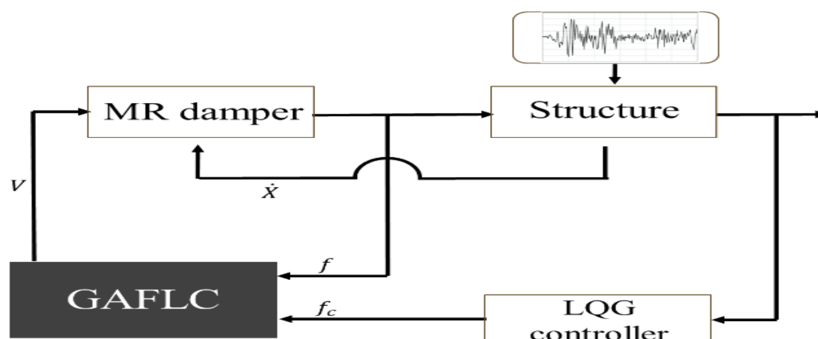
$$f_i = p_i a + q_i b + r_i \qquad i = 1, 2, ..., 25 \tag{۶}$$

در معادله بالا مقادیر a و b مقادیر نیروی ورودی و ضرایب p، q و r ضرایب مجهول این معادلات خواهند بود. با توجه به ۲۵ حالت یاد شده در پایگاه قوانین، ۷۵ ضریب برای تعریف معادله فوق نیاز می‌باشد.

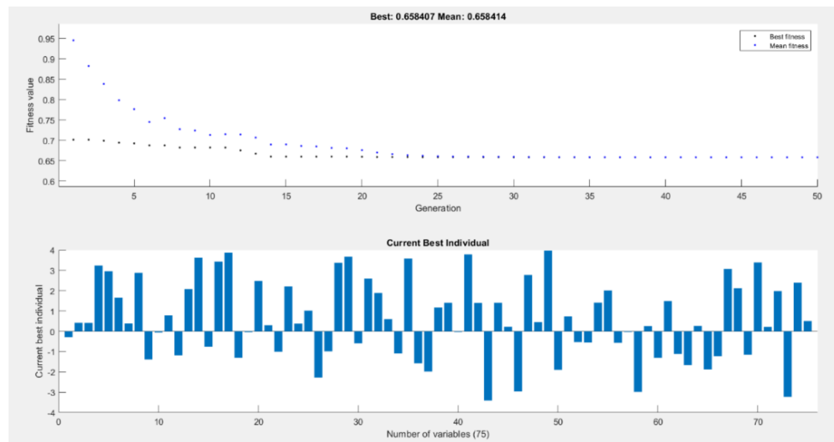
در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب برای تعیین این پارامترها بر مبنای بهینه‌سازی پاسخ سازه استفاده می‌شود. معیار بهینه‌سازی کمینه کردن بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه است. در ابتدا کنترل‌کننده به وسیله الگوریتم ژنتیک برای ۱/۵ برابر زلزله ال‌سنترو توسط نرم‌افزار متلب آموزش داده شده و سپس عملکرد کنترل‌کننده بی‌سیم در سایر زلزله ها با شدت‌های مختلف مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

جدول ۲ پایگاه قوانین فازی

		LQG force				
		NL	NE	ZE	PO	PL
Measured Force	NL	mf1	mf2	mf3	mf4	mf5
	NE	mf6	mf7	mf8	mf9	mf10
	ZE	mf11	mf12	mf13	mf14	mf15
	PO	mf16	mf17	mf18	mf19	mf20
	PL	mf21	mf22	mf23	mf24	mf25



شکل ۶ راهبرد کنترل فازی-ژنتیک [13]



شکل ۷ فرایند آموزش کنترل‌کننده فازی

نتایج عددی

در شکل (۷) فرایند آموزش کنترل‌کننده فازی در سازه ۳ طبقه بی‌سیم نشان داده شده است. در شکل (۹ و ۸) پاسخ تاریخچه زمانی جابه‌جایی و تاریخچه زمانی شتاب طبقه سوم در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده به نمایش در آمده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو کنترل بی‌سیم و باسیم عملکرد مناسبی در کاهش پاسخ‌های سازه از جمله جابه‌جایی و شتاب دارند و عملکرد نزدیکی نسبت به یکدیگر دارند. به منظور مطالعه بیشتر مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی و همچنین بیشینه شتاب طبقات در شکل (۱۰) به تصویر در آمده است. در دو زلزله السنترو و هاچینوهه هردو نوع کنترل باسیم و بی‌سیم مقدار جابه‌جایی نسبی و شتاب طبقات را نسبت به حالت کنترل نشده کاهش داده‌اند. در زلزله ال سنترو مقادیر شتاب به حالت کنترل نشده نزدیک شده است. در زلزله نورثریج عملکرد کنترل بی‌سیم بسیار به کنترل باسیم نزدیک شده است. هر چند کنترل باسیم عملکرد بهتری در طبقات اول و دوم دارد. در زلزله کوبه نیز بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه مجهز به سنسور بی‌سیم نسبت به سازه کنترل نشده کاهش داشته است و عملکرد نزدیکی با کنترل باسیم دارد. عملکرد بیشینه شتاب طبقات در زلزله کوبه مناسب بوده و توانسته شتاب طبقات دوم و سوم را نسبت به کنترل باسیم کاهش دهد.

در این پژوهش از ۶ معیار ارزیابی (J1-J6) مطابق جدول (۳) برای بررسی رفتار کنترل‌کننده بی‌سیم و مقایسه ساده‌تر آن با حالت باسیم استفاده شده است. معیارهای سنجش پاسخ سازه شامل معیار J1 حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات، J2 حداکثر شتاب طبقات، J3 حداکثر برش پایه، J4 حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی طبقات، J5 حداکثر نرم شتاب طبقات و J6 حداکثر نرم برش پایه نسبت به سازه کنترل نشده هستند.

در روابط جدول، i شماره طبقات، $d_i(t)$ جابه‌جایی نسبی طبقات، h_i ارتفاع طبقه، $\delta^{\max}$ حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت اثر زلزله‌های مختلف می‌باشد. شتاب طبقه با $\ddot{x}_{ai}(t)$، $\ddot{x}_a^{\max}$ حداکثر شتاب مطلق طبقات در حالت کنترل نشده، m_i جرم طبقه و $F_b^{\max}$ حداکثر برش پایه زلزله در حالت کنترل نشده است. مقدار نرم از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\|.\| = \sqrt{\frac{1}{t_f}\int_0^{tf}[.]^2 .dt} \qquad (۲)$$

که در آن t_f مدت زمان زلزله و پس از آن می‌باشد به طوری که پاسخ سازه به صفر میل کند که این مقدار برای زلزله‌های السنترو، هاچینوهه و نورثریج ۱۰۰ ثانیه و برای زلزله کوبه ۱۸۰ ثانیه می‌باشد.

حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی $\|\delta^{\max}\|$، حداکثر نرم شتاب طبقات $\|\ddot{x}_{ai}(t)\|$ و $\|F_b^{\max}\|$ حداکثر نرم برش پایه در حالت کنترل نشده است.

مقایسه معیارهای ارزیابی سازه در دو حالت کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم در جدول (۵) آورده شده است. مقدار میانگین معیار بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) در حالت با سیم و بی‌سیم به ترتیب ۰/۵۲۴ و ۰/۶۱۷ می‌باشد. در حالت کنترل بی‌سیم شاهد افزایش ۱۷

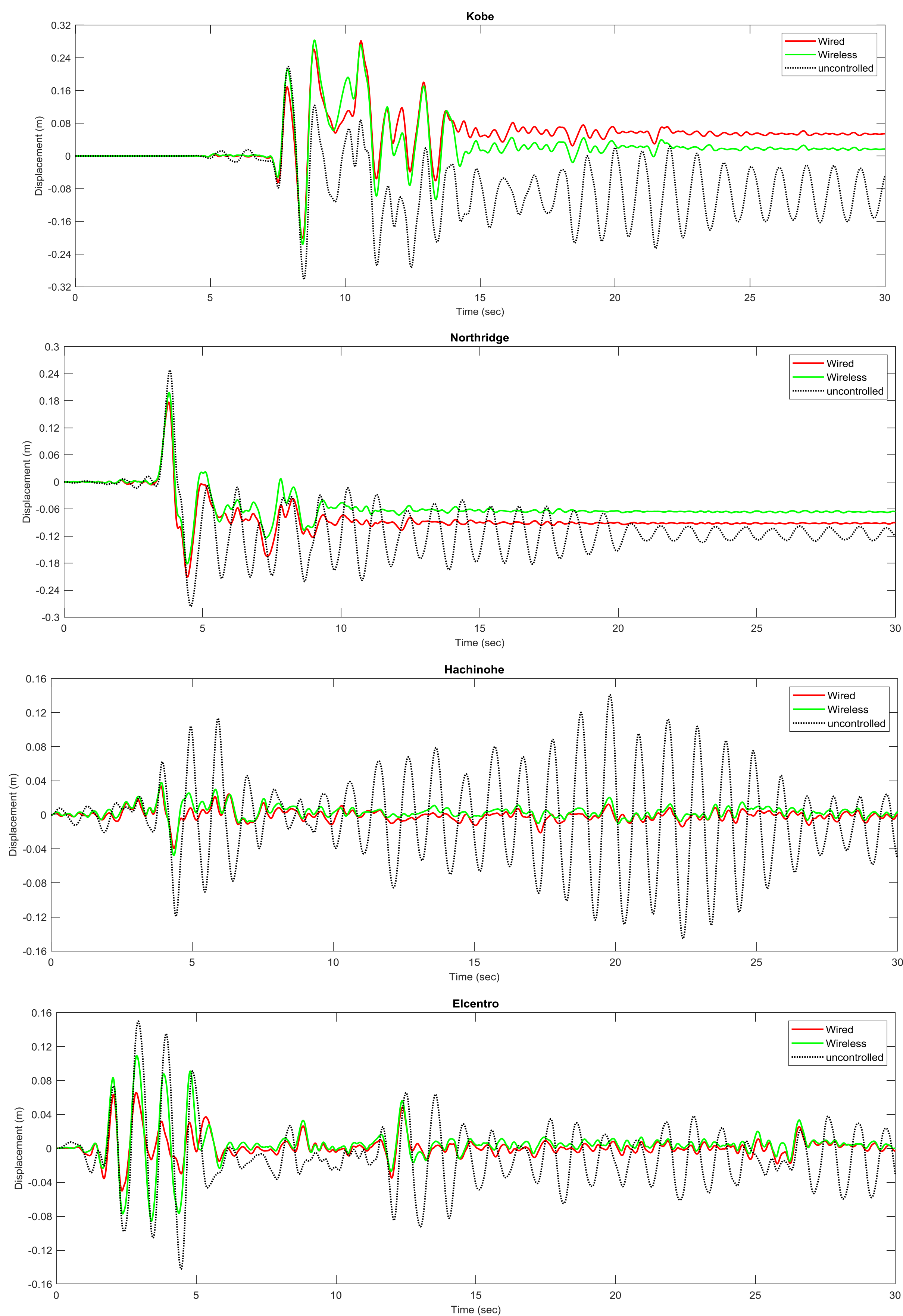
درصدی در میانگین این معیار هستیم. میانگین معیار ارزیابی J2 که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، در کنترل باسیم ۰/۷۹۳ و در کنترل بی سیم ۰/۸۹۶ می‌باشد. مقدار افزایش در میانگین این معیار ۱۳ در صد می‌باشد. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده (J3) در سازه با سیم ۰/۷۸۸ و در سازه مجهز به سنسورهای بی‌سیم ۰/۹۱ می‌باشد که شاهد افزایش ۱۵ درصدی در میانگین این معیار هستیم. سازه مجهز به سنسور بی‌سیم باعث افزایش چشم‌گیر میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم شتاب و نرم برش پایه شده است که نشان می‌دهد ارتعاش سازه در انتهای زمان زلزله نیز ادامه‌دار می‌باشد. در شکل (۱۰) نمودار میله‌ای مقادیر میانگین معیارهای ارزیابی به تصویر در آمده است. در جدول (۴) نیز پارامترهای توابع نتیجه کنترل‌کننده فازی در سازه ۳ طبقه آورده شده است.

جدول ۳ معیارهای ارزیابی سازه [10]

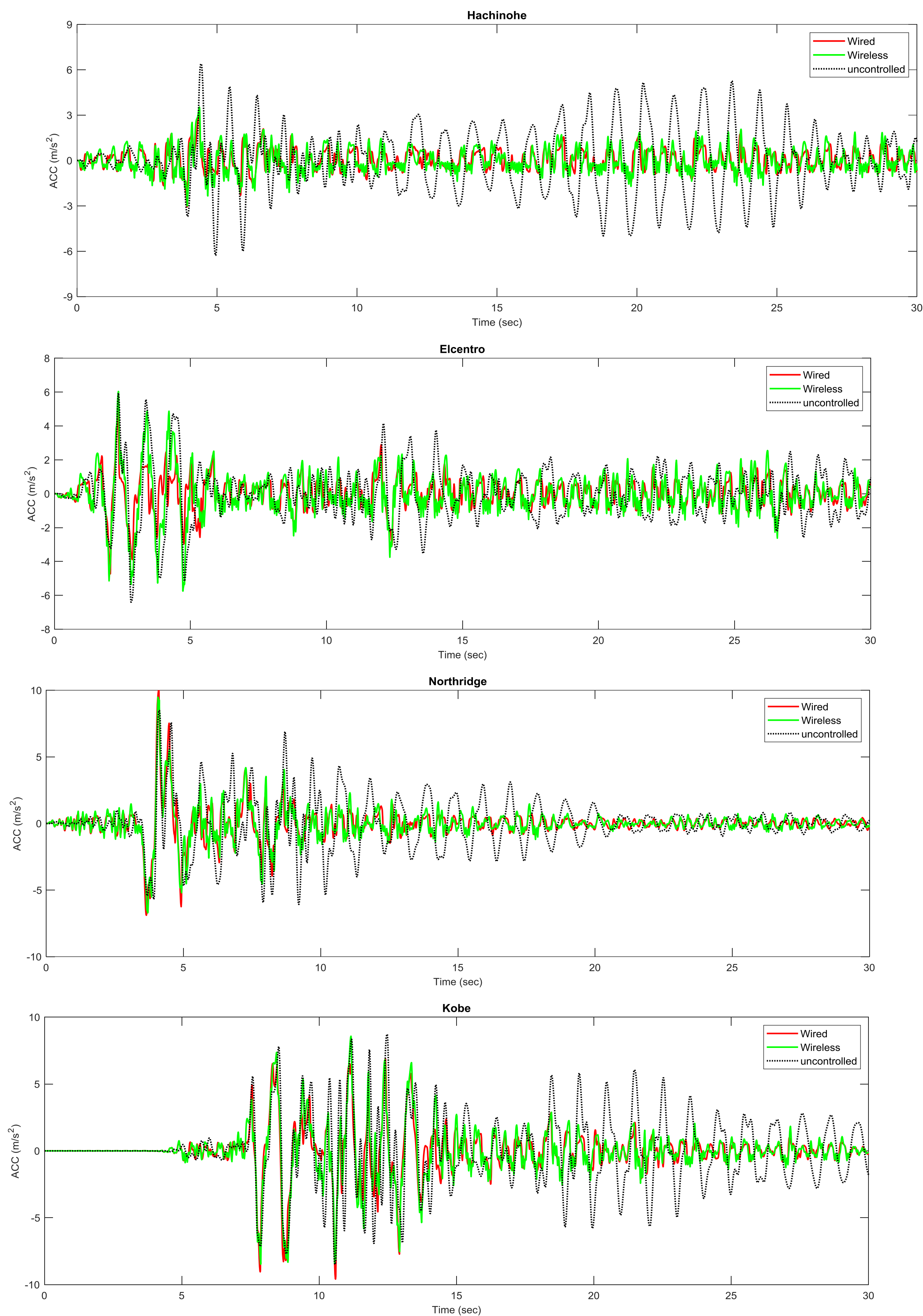
Interstory drift ratio	Level acceleration	Base shear
$J_1 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \dfrac{\lvert d_i(t) \rvert}{h_i}}{\delta^{\max}} \right\}$	$J_2 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \lvert \ddot{x}_{ai}(t) \rvert}{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$	$J_3 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \lvert \sum_i m\ddot{x}_{ai}(t) \rvert}{F_b^{\max}} \right\}$
Normed interstory drift	Normed Level acceleration	Normed base shear
$J_4 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \dfrac{\lVert d_i(t) \rVert}{h_i}}{\lVert \delta^{\max} \rVert} \right\}$	$J_5 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \lVert \ddot{x}_{ai}(t) \rVert}{\lVert \ddot{x}_{ai}^{\max} \rVert} \right\}$	$J_6 = \max_{\substack{Elcentro\\Hachinohe\\Northridge\\Kobe}} \left\{ \dfrac{\max_{t,i} \lVert \sum_i m\ddot{x}_{ai}(t) \rVert}{\lVert F_b^{\max} \rVert} \right\}$

جدول ۴ پارامترهای توابع نتیجه کنترل کننده فازی

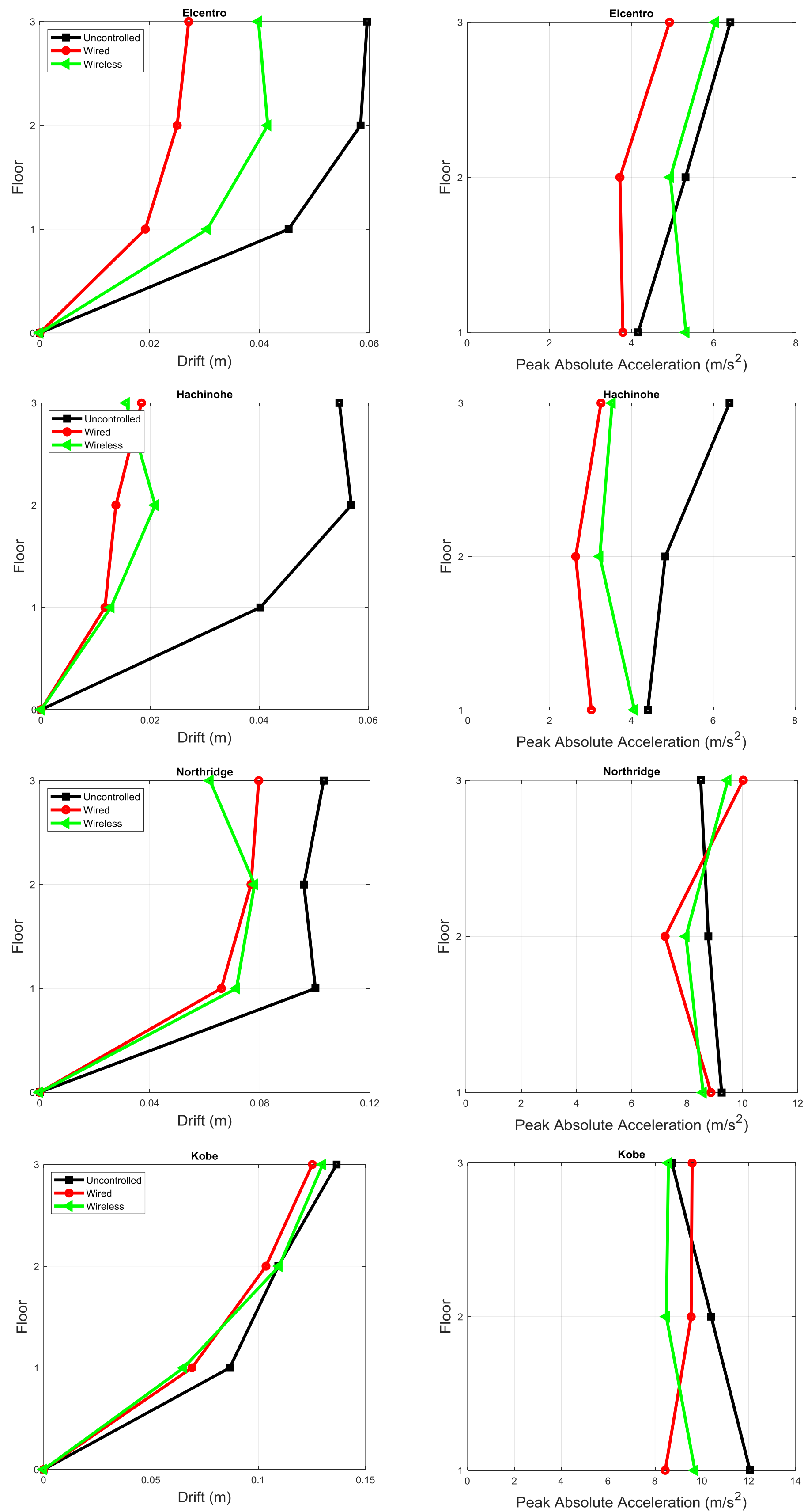
	p_i	q_i	r_i		p_i	q_i	r_i
mf1	-0.282	0.421	0.414	mf14	-0.029	3.788	1.397
mf2	3.234	2.959	1.656	mf15	-3.405	1.404	0.227
mf3	0.388	2.880	-1.378	mf16	-2.951	2.777	0.459
mf4	-0.051	0.790	-1.182	mf17	3.972	-1.894	0.735
mf5	2.077	3.627	-0.758	mf18	-0.525	-0.544	1.410
mf6	3.437	3.875	-1.294	mf19	2.013	-0.561	-0.029
mf7	-0.035	2.480	0.302	mf20	-2.977	0.257	-1.297
mf8	-1.003	2.211	0.381	mf21	1.488	-1.111	-1.660
mf9	1.022	-2.272	-0.981	mf22	0.265	-1.867	-1.220
mf10	3.375	3.673	-0.592	mf23	3.070	2.124	-1.152
mf11	2.598	1.887	0.606	mf24	3.390	0.222	1.980
mf12	-1.092	3.578	-1.575	mf25	-3.219	2.393	0.508
mf13	-1.974	1.171	1.406				



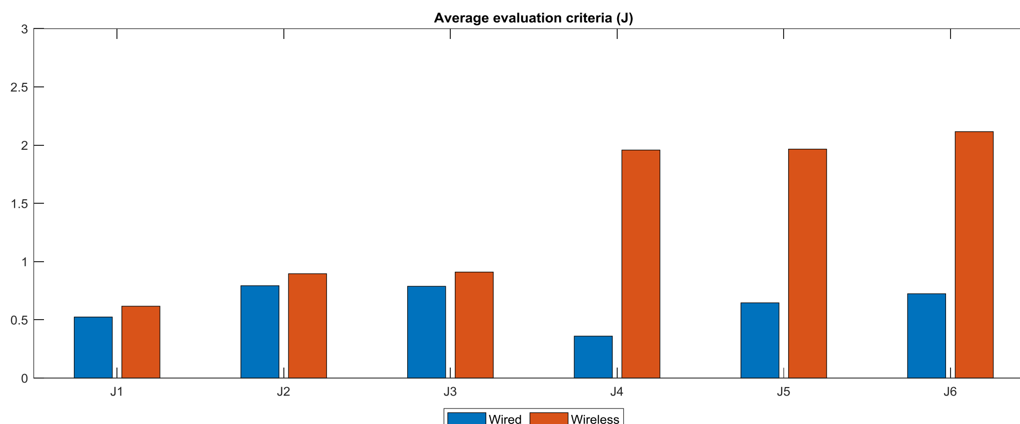
شکل ۸ تاریخچه جابه‌جایی طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۹ تاریخچه شتاب طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۰ بیشینه جابه‌جایی نسبی و بیشینه شتاب مطلق طبقات سازه در سه حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۱ نمودار میله‌ای میانگین معیارهای ارزیابی J1 تا J6 در سازه ۳ طبقه در دو حالت کنترل باسیم و بی‌سیم

جدول ۵ مقایسه معیارهای ارزیابی سازه سه طبقه در دوحالت کنترل باسیم و بی‌سیم

		Elcentro			Hachinohe			Northridge		Kobe		AVG
	Controller	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	0.5	1	
J1	Wired	0.313	0.454	0.641	0.211	0.319	0.406	0.435	0.793	0.799	0.864	0.524
	Wireless	0.343	0.697	0.660	0.187	0.364	0.515	0.578	0.779	1.149	0.898	0.617
J2	Wired	0.595	0.752	1.010	0.568	0.496	0.735	0.855	1.045	1.080	0.795	0.793
	Wireless	0.718	0.923	1.15	0.668	0.628	0.988	1.041	0.988	1.050	0.806	0.896
J3	Wired	0.519	0.799	0.961	0.397	0.627	0.801	0.693	0.982	1.035	1.064	0.788
	Wireless	0.544	1.028	1.242	0.511	0.695	0.976	0.938	1.042	1.053	1.072	0.910
J4	Wired	0.229	0.294	0.281	0.099	0.127	0.167	0.193	0.818	0.794	0.604	0.360
	Wireless	0.938	1.558	1.698	0.424	0.517	0.695	0.345	2.715	6.267	1.428	1.958
J5	Wired	0.549	0.562	0.574	0.345	0.333	0.361	1.187	1.422	0.498	0.629	0.646
	Wireless	1.910	2.373	2.314	1.185	0.157	1.318	1.933	2.041	2.557	2.874	1.966
J6	Wired	0.605	0.615	0.615	0.375	0.365	0.398	1.408	1.606	0.543	0.706	0.724
	Wireless	2.114	2.492	2.377	1.256	1.236	1.407	2.19	2.266	2.693	3.131	2.116

نتیجه‌گیری

این مطالعه پتانسیل استفاده از ارتباطات بی‌سیم را برای کنترل سازه‌های محک بررسی می‌کند. بر اساس مدل محاسباتی بی‌سیم در سازه، هر دو روش کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم برای کنترل یک سازه فولادی ۳ طبقه با میراگر MR در هر طبقه تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

سیستم کنترل بی‌سیم پیشنهاد شده در این مقاله، به خوبی توانسته است پاسخ‌های سازه را کنترل کند. به طور کلی استفاده از کنترل بی‌سیم به دلیل تأخیر زمانی بیشتر باعث افزایش اندک پاسخ‌های سازه نسبت به حالت باسیم شده است. برای ارزیابی بهتر از ۶ معیار ارزیابی بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه شتاب و بیشینه برش پایه و نرم آنها بهره‌جویی شده است. کنترل بی‌سیم باعث افزایش ۱۷ درصدی در مقدار میانگین معیار

بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) نسبت به حالت باسیم شده است. در معیار ارزیابی J2 که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، کنترل بی سیم افزایش ۱۳ درصدی را نسبت به حالت باسیم به ثبت رسانده است. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده (J3) در سازه بی سیم نسبت به سیستم باسیم نیز ۱۵ درصد افزایش یافته است.

کنترل بی‌سیم، میانگین بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات و میانگین بیشینه شتاب طبقات در سازه را نسبت به سازه کنترل نشده به ترتیب، ۹ و ۱۰ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل بی‌سیم برش پایه را نیز نسبت به مدل باسیم، کمتر کاهش داده است. کنترل بی‌سیم میزان بیشینه برش پایه را در سازه ۳ طبقه نسبت به حالت کنترل نشده، ۱۲ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل بی‌سیم باعث افزایش چند برابری میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم بیشینه شتاب طبقات و نرم بیشینه برش پایه نسبت به مدل کنترل باسیم شده است.

سپاسگزاری

مراجع

1. C.-H. Loh et al., "Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 10, pp. 1303-1328, 2007.
2. C. R. Farrar, G. Park, D. W. Allen, and M. D. Todd, "Sensor network paradigms for structural health monitoring," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 13, no. 1, pp. 210-225, 2006.
3. J. P. Lynch and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," *Shock and vibration digest*, vol. 38, no. 2, pp. 91-130, 2006.
4. Y. Wang, R. A. Swartz, J. P. Lynch, K. H. Law, K.-C. Lu, and C.-H. Loh, "Application of Decentralized Wireless Sensing and Control in Civil Structures," *in US-Taiwan Workshop on Smart Structural Technology for Seismic Hazard Mitigation*, Taipei, Taiwan, 2006.
5. J. P. Lynch and K. H. Law, "Decentralized control techniques for large-scale civil structural systems," *in Proc. of the 20th Int. Modal Analysis Conference (IMAC XX)*, pp. 406-413, February 4, 2002.
6. Z. Sun, B. Li, S. J. Dyke, C. Lu, and L. Linderman, "Benchmark problem in active structural control with wireless sensor network," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, no. 1, pp. 20-34, 2016.
7. L. E. Linderman, *Smart wireless control of civil structures.* University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
8. A. Y. Fallah and T. Taghikhany, "Time-delayed decentralized H2/LQG controller for cable-stayed bridge under seismic loading," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, no. 3, pp. 354-372, 2013.
9. R. A. Swartz and J. P. Lynch, "Strategic network utilization in a wireless structural control system for seismically excited structures," *Journal of structural engineering*, vol. 135, no. 5, pp. 597-608, 2009.
10. Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, and S. Dyke, "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings," *Journal of engineering mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 366-385, 2004.

11. S. J. Dyke, F. Yi, S. Frech, and J. D. Carlson, "Application of Magnetorheological Dampers to Seismically Excited Structures, 361," *in Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, vol. 3727, p. 410, March 1999.
12. B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, and J. Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
13. H. Fazaeli Hosseini Nejad and A. Karamodin, "Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 107-123, 2022 .(in Persian)